

柴北缘鱼卡榴辉岩变质 P - T 演化历史

胡荣国^{1,2}, 赵义来¹, 夏志鹏¹, 邱华宁²

(1. 桂林理工大学 a. 广西隐伏金属矿产勘查重点实验室; b. 地球科学学院, 广西 桂林 541004;

2. 中国科学院广州地球化学研究所 同位素地球化学国家重点实验室, 广州 510640)

摘要: 鱼卡榴辉岩-片麻岩地体位于柴北缘超高压变质岩带的北西端, 以榴辉岩系为主的高压-超高压变质岩主要以透镜状、布丁状或似层状赋存于片岩、片麻岩中。区内榴辉岩的典型矿物组合为石榴石+绿辉石+多硅白云母+金红石。石榴石变斑晶普遍保存进变质生长环带, 从核部到边部石榴石的化学成分、包体矿物的种类和粒度皆呈现出规律的分带性。岩相学和矿物化学研究显示榴辉岩经历了4期与俯冲和折返作用有关的变质演化历史: 进变质角闪岩相($P=0.91\sim0.98$ GPa, $T=527\sim600$ °C)、峰期榴辉岩相($P=2.62\sim3.07$ GPa, $T=675\sim711$ °C), 减压降温过程中的麻粒岩相-高角闪岩相($P=1.33\sim1.72$ GPa, $T=633\sim687$ °C)和低角闪岩相($P=0.56\sim0.88$ GPa, $T=490\sim587$ °C)。榴辉岩中的各类超高压变质矿物组合完整的记录鱼卡榴辉岩从俯冲到折返整个变质过程, 即从最初增温增压的进变质到温度和压力都达到顶峰的峰期变质, 再到降温降压的退变质这样一个顺时针 P - T 演化过程。

关键词: 榴辉岩; 超高压变质作用; P - T 轨迹; 柴北缘

中图分类号: P588.345

文献标志码: A

0 引言

柴达木盆地北缘(简称柴北缘)早古生代造山带位于青藏高原东北部, 夹持于柴达木地块和祁连山地体之间, 东西两端分别被哇红山断裂和阿尔金断裂截断, 呈NW-SE向展布, 断续绵延超700 km, 是柴北缘加里东俯冲碰撞杂岩带最主要的组成部分。20世纪90年代以来, 伴随着区内高压超高压变质岩石^[1-3]和变质岩中超高压变质标志矿物(如柯石英、微粒金刚石等)以及超高压变质矿物组合(透长石+多晶石英)的相继发现和确认^[2,4-8], 使得柴北缘地区的地质研究越来越受到重视, 并取得了一系列的成果。这些超高压变质岩和超高压变质矿物的发现和确定, 不仅证明了超高压变质作用在柴北缘造山带中的存在, 使其成为继东部的苏鲁-大别超高压变质带之后我国西部新厘定的又一条高压超高压变质带, 同时也暗示了该地区曾

经是一条重大的大地构造边界。

柴北缘超高压变质带主要分为两段, 西段呈NW-SE走向, 宽3~5 km, 由鱼卡、绿梁山和锡铁山这3个地体组成; 东段主要是都兰超高压地体, 呈EW走向, 宽度超过15 km(图1)。本文研究的鱼卡河榴辉岩位于柴北缘超高压变质岩带的西段。榴辉岩主要呈透镜状产于中新元古代的片麻岩中, 这些片麻岩包括花岗质片麻岩、石榴石白云母石英片岩、二云母石英片岩、黑云角闪片岩, 其中以花岗质片麻岩和副变质的石榴石蓝晶石云母片岩为主。直接包裹榴辉岩的片麻岩, 无论正片麻岩还是副片麻岩, 其中石榴石变斑晶的数量和粒度明显增多、变大, 并普遍出现多硅白云母、蓝晶石和硬绿泥石等指示高压变质的矿物相。榴辉岩保存了丰富的进变质和退变质的矿物学记录。前人已从岩石学、年代学及地球化学等方面做了大量的研究^[9-11], 但对榴辉岩的温压演

收稿日期: 2015-04-26

基金项目: 中-荷联合培养博士生计划项目(08PhD-08); 广西矿冶与环境科学实验中心项目

作者简介: 胡荣国(1982—), 男, 博士, 地球化学专业, hurongguo@163.com。

引文格式: 胡荣国, 赵义来, 夏志鹏, 等. 柴北缘鱼卡榴辉岩变质 P - T 演化历史[J]. 桂林理工大学学报, 2015, 35(4): 667-674.

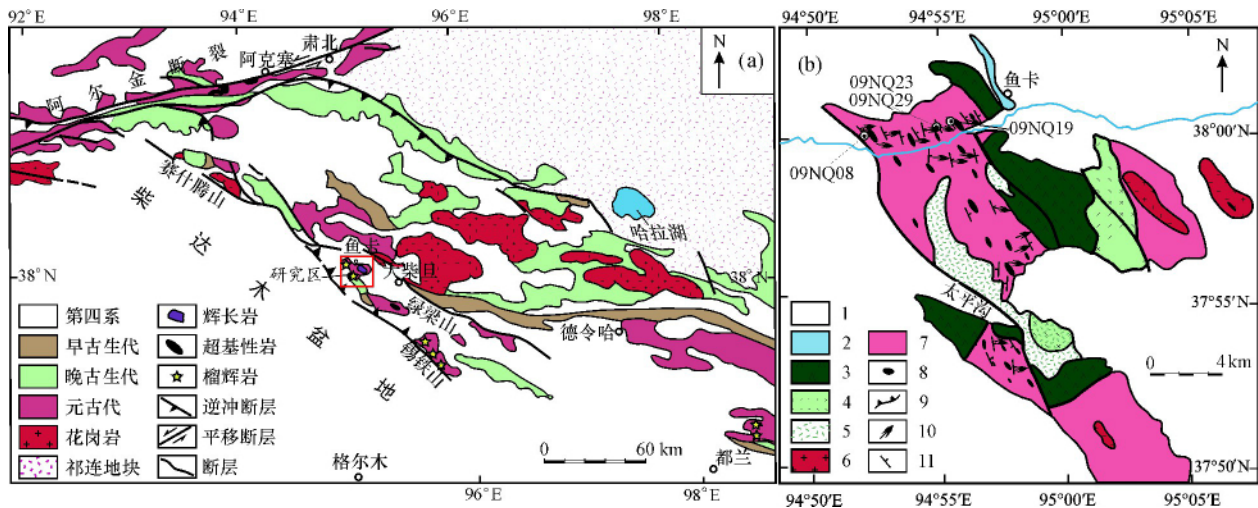


图1 柴北缘变质带地质简图 (a) 和鱼卡榴辉岩-片麻岩地体地质简图 (b)

Fig. 1 Simplified geological maps of the North Qaidam UHP metamorphic belt (a) and geological sketch of Yuka eclogite-gneiss terrane (b)

1—第四系—第三系; 2—侏罗系; 3—奥陶系火山岩; 4—早古生代辉长岩; 5—超基性岩; 6—早古生代花岗岩; 7—达肯达坂群; 8—榴辉岩; 9—逆冲断层; 10—拉伸线理; 11—片理—片麻理

化历报道较少。本文在详细的岩相学研究基础上, 利用传统的矿物对温压计法来估算榴辉岩的变质 $P-T$ 轨迹, 进而探讨其地质意义。

1 地质背景及样品野外产状

鱼卡榴辉岩-片麻岩地体位于柴北缘超高压变质岩带的北西端, 离大柴旦约 40 km 处, 是柴北缘高压超高压变质带中最主要的榴辉岩出露地点之一 (图1)。该高压变质带主要由花岗质片麻岩所组成, 以榴辉岩系为主的高压-超高压变质岩主要以透镜状、布丁状或似层状赋存于片岩、片麻岩中, 局部可见含石榴子石白云母石英片岩同榴辉岩一起被包裹于花岗质片麻岩中。这些透镜体体积规模不等, 多在 20 m × 10 m 左右, 最大的可达 35 m × 15 m, 小者约 0.5 m × 1 m。透镜体长轴方向同围岩片理-片麻理及区域构造线方向基本一致, 部分榴辉岩透镜体可构成大型的不对称眼球状构造, 表明榴辉岩形成后遭受过强烈的剪切变形作用叠加^[12]。

根据变质矿物组合, 鱼卡榴辉岩可分为中-粗粒新鲜榴辉岩、退变质榴辉岩以及斜长角闪岩等岩石类型。新鲜榴辉岩矿物组合多为 Grt-Omp-Ph-Rt。片麻岩以花岗质片麻岩为主, 少量泥质片麻岩 (石榴石白云母石英片岩、白云母石英片岩、二云母片岩), 两者关系不清, 局部见泥质片麻岩包裹在花岗质片麻岩中。

2 岩相学及矿物学

在近 20 个榴辉岩样品岩相学观察的基础上, 选择两个代表性的榴辉岩样品 (09NQ08 和 09NQ23) 和两个退变榴辉岩样品 (09NQ19 和 09NQ29) 进行详细描述和成分分析。榴辉岩矿物测试分析工作在荷兰阿姆斯特丹自由大学岩石系电子探针分析实验室完成, 仪器型号为 JEOL JXA8800 型电子探针仪, 工作条件为加速电压 15 kV, 探针电流 20 nA, 作用时间为 20 ~ 30 s, 束斑直径为 2 μm。本次研究对石榴石和绿辉石都采用 Droop^[13] 电价平衡法。多硅白云母作全铁为 Fe^{2+} 处理。角闪石化学式采用 Holland & Blundy^[14] 提出的方法计算, 角闪石同样作全铁为 Fe^{2+} 处理。

2.1 岩相学

中-粗粒新鲜榴辉岩 (09NQ08 和 09NQ23) 风化面多呈浅棕绿色、淡绿色或灰绿色, 新鲜面呈带褐红色调的墨绿色、红棕色, 致密坚硬, 块状构造, 粒状变晶结构。主要保存榴辉岩相 (M2, 图 2a、图 2b) 变质矿物组合: 石榴子石 (47% ~ 50%)、绿辉石 (30% ~ 35%)、角闪石 (5% ~ 10%)、黝帘石 (2% ~ 5%) 等。石榴子石多呈半自形-他形近等轴粒状, 粒度一般在 0.4 ~ 3 mm, 裂纹发育。大颗粒新鲜石榴子石内部多含石英、角闪石 (Amp-I)、斜长石 (Pl-I)、金红石以及帘石类矿物等包体, 为前榴辉岩相 (M1) 矿物残余。

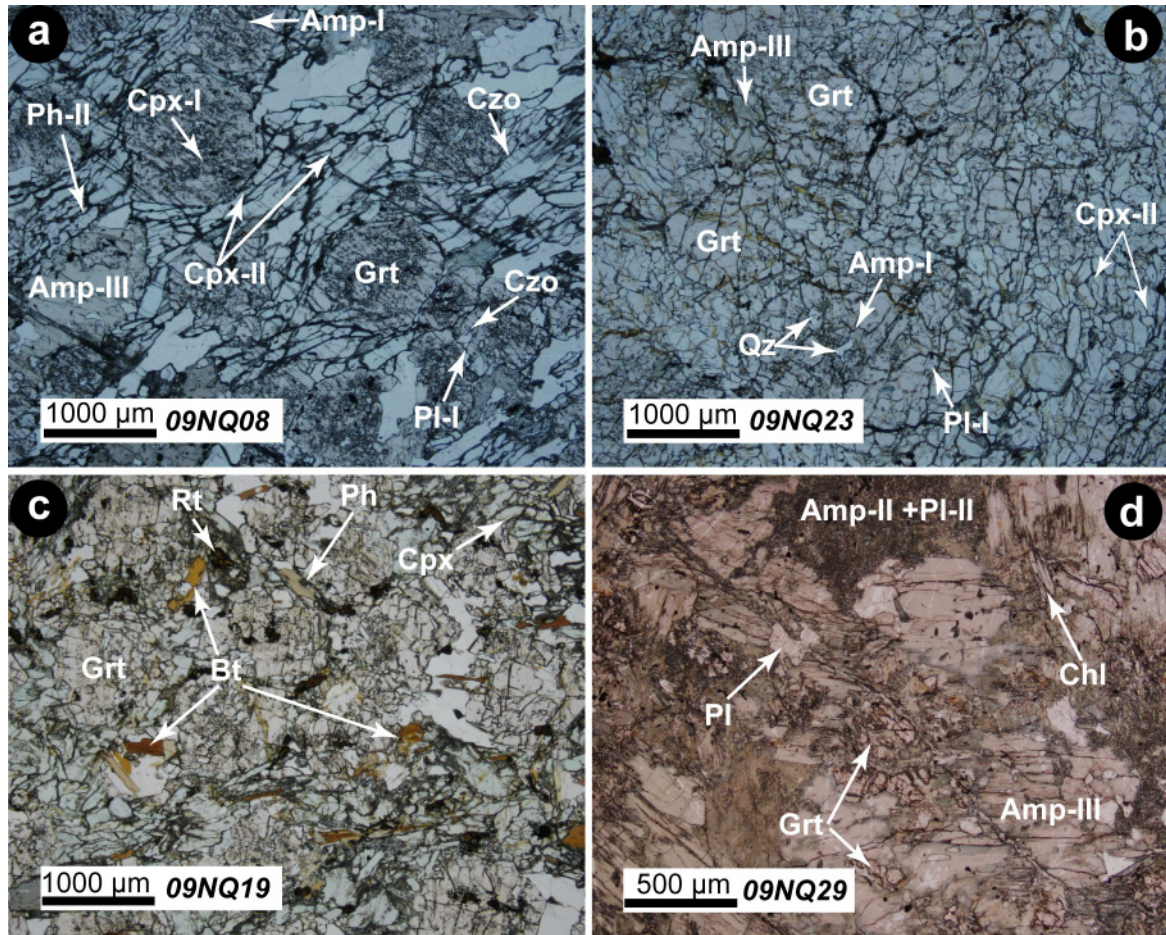


图2 鱼卡榴辉岩的显微结构图片(单偏光)

Fig. 2 Photomicrographs in cross-polarized light (PPL) showing the textural relationships of the UHP metamorphic rocks from the Yuka terrane

a—中—粗粒榴辉岩, 自形—半自形石榴子石斑晶被弱定向、拉长的绿辉石(Omp)、石英和黝帘石环绕; b—中—粗粒榴辉岩, 基质中绿辉石(Omp)呈短柱状, 石榴子石斑晶包含石英、角闪石(Amp-I)和斜长石(Pl-I)包体; c—强退变质榴辉岩中粗粒黑云母; 部分大颗粒石榴子石斑晶包裹有白云母; d—榴辉岩中残余石榴石被角闪石包裹, 绿辉石基本消失, 退变质成 Amp + Pl 后成合晶

中—粗粒退变质榴辉岩(09NQ19)是鱼卡地体中最主要的榴辉岩类型。该类岩石角闪石含量明显增加, 绿辉石含量则显著降低。岩石风化面多呈灰黑色, 新鲜面棕绿色, 以块状构造、条带状构造为主, 中粒或斑状变晶结构。主要矿物成分为石榴子石(40%~55%)、角闪石(30%~40%)、绿辉石(5%~10%)、白云母(~3%)、黝帘石(~5%)(图2c)。

退变质榴辉岩(09NQ29)由榴辉岩退变质而来。岩石呈灰绿—灰黑色, 块状构造, 中—粗粒粒状变晶结构。主要由石榴子石(5%~8%)、角闪石(~60%)、斜长石(5%~8%)、帘石(10%~13%)、绿泥石(3%)、石英(5%)以及少量黑云母所组成(图2d)。岩石主要保存了角闪岩相(M3)矿

物。石榴子石含量较少, 粒度变化大, 多为不规则粒状, 大多被角闪石所包裹。角闪石(Amp-III)粒度变化极大, 从0.3~10 mm均可观察到, 他形柱状或粒状为主, 相互间呈镶嵌接触, 内部包裹小颗粒的帘石、石英、石榴子石和长石等矿物, 部分出现帘石化或绿泥石化蚀变。斜长石(Pl-III)出现在角闪石边部, 呈替代角闪石的趋势。

2.1 矿物化学

石榴子石是鱼卡地区最常见的特征变质矿物。中—粗粒新鲜榴辉岩石榴子石的端元分子为: $\text{Prp}_{10-35}\text{Alm}_{46-59}\text{Gro}_{12-31}\text{And}_{0.1-14}\text{Sps}_{0.4-3.7}$ 。对榴辉岩样品(09NQ23)内的石榴子石变斑晶进行详细的岩相学观察以及成分剖面分析(图3), 发现该样品内的石榴子石被单斜辉石所环绕, 其内含有丰富

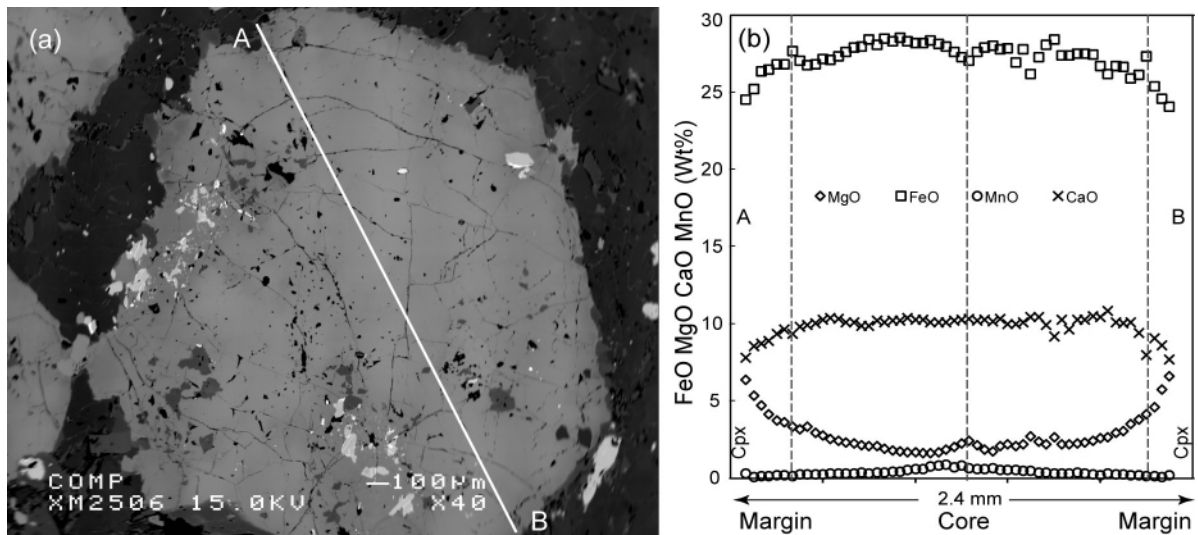


图3 石榴子石成分环带点分析剖面图 (09NQ23)

Fig. 3 BSE image (a) and composition profile (b) of garnet for the Yuka fresh coarse-grained eclogite 09NQ23

的石英、斜长石、金红石以及角闪石等矿物包体, 这些包体随机分布, 但呈现出包裹颗粒粒径由边缘向核部逐步减小, 数量逐渐减少的趋势。石榴子石成分变化较大, 显示出明显的成分环带(图3)。CaO、MgO、MnO和FeO在横切石榴子石中心的成分剖面上呈现出近对称的变化规律, 可区分出核部、幔部、边部和最边部4个组分。MgO的含量在核部基本稳定, 略有起伏, 从核部到边部明显升高, MgO和MgO/(FeO+MgO)的最大值出现在石榴子石最边部, 整体呈“碗”型。MnO的含量则从核部到边部缓慢降低, 且在边部趋于稳定, 在最边部有升高的趋势, 呈现出典型增温石榴子石环带特征, 整体呈“钟”型。CaO含量变化相对要复杂, 在核部基本稳定, 从核部到幔部变化较大, 总体升高, 且在幔部和边部处达到最高值, 而后逐步下降。石榴子石从颗粒中心到边部Mg含量增加, Mn和Ca含量减少, 并且呈左右对称, 为典型生长环带。相比于新鲜中-粗粒榴辉岩中的石榴子石, 退变质榴辉岩(09NQ19和09NQ29)中的石榴子石在成分上显示出较大的差别, 端元分子式为: $\text{Prp}_{10-44}\text{Alm}_{34-67}\text{Gro}_{0.2-0.3}\text{And}_{1.9-4.2}\text{Sps}_{13-30}$ 。主要表现在Sps(锰铝榴石)含量明显增高, 而Gro(钙铝榴石)含量显著降低。这类石榴子石同黑云母、角闪石共生, 同样未显示出明显的成分环带, 可能为角闪岩相条件下新生的石榴石。

单斜辉石电子探针数据分析结果基于6个氧原子以及假设所有铁为FeO进行计算。单斜辉石是组成榴辉岩的特征变质矿物。中-粗粒新鲜榴辉岩(09NQ08和09NQ23)中绿辉石化学成分经过计算, 硬玉含量(摩尔分数, 下同)在33%~53%, 变化较大, 含量较高, 表明岩石形成时压力较大。退变质榴辉岩(09NQ19)中硬玉含量为26%~44%。

角闪石电子探针数据分析结果基于23个氧原子以及假设所有铁为FeO进行计算^[14]。中-粗粒新鲜榴辉岩(09NQ08和09NQ23)和退变质榴辉岩(09NQ19)含有的角闪石成分复杂, 种类多样, 既有Ca角闪石, 也有Na-Ca角闪石。具体而言, 角闪石主要以3种形式存在: (1)位于石榴子石变斑晶中作为包体存在Amp-I; (2)环绕石榴子石的冠状体Amp-II; (3)与石榴子石、多硅白云母、绿辉石组成平衡共生组合Amp-III。在Leake等^[15]的分类图中: Amp-I为镁角闪石和镁红钠闪石; Amp-II为阳起石和冻蓝闪石; Amp-III最为复杂, 包括镁角闪石、阳起石、浅闪石、韭闪石、镁红钠闪石、冻蓝闪石以及蓝透闪石。退变质榴辉岩(09NQ29)发育的角闪石主要为Amp-III类型, 包括镁角闪石、钙镁闪石、浅闪石、蓝透闪石和冻蓝闪石。

白云母($\text{KAl}_2[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}](\text{OH})_2$)在鱼卡高压-超高压地体中分布广泛。电子探针分析结果显示榴辉岩中Si原子数变化范围较大, 在3.27~3.57 p. f. u., 属于多硅白云母。

3 P - T 估算及其演化

根据榴辉岩以及不同退变质程度的榴辉岩显微结构及矿物组合, 本区的榴辉岩可划分为前榴辉岩相(M1)、榴辉岩相(M2)及退变质麻粒岩相-高角闪岩相(M3)和角闪岩相(M4)这4个演化阶段, 代表性矿物组合分别为: ①前榴辉岩相变质阶段(M1), 具有生长环带特征的石榴子石变斑晶核部成分以及残留核部的进变质包体矿物, 代表性矿物组合为 $\text{Grt} + \text{Amp-I} + \text{Pl-I} + \text{Qz}$; ②榴辉岩相阶段(M2), 主要特征矿物组合为 $\text{Grt} + \text{Omp} + \text{Ph} + \text{Rt}$, 主要保存于相对新鲜的中-粗粒新鲜榴辉岩; ③麻粒岩相-高角闪岩相(M3), 主要特征矿物组合为 $\text{Grt} + \text{Bt} + \text{Omp} + \text{Ph}$, 保存于退变质榴辉岩中; ④角闪岩相退变质阶段(M4), 主要特征矿物组合为 $\text{Grt} + \text{Amp-III} + \text{Pl-III}$ 和 $\text{Amp-II} + \text{Pl-II}$ 。主要保存于榴辉岩中。基于这些不同变质阶段产生的不同的平衡共生组合, 因此可以用不同的矿物对温压计来估算其 P - T 条件。

前榴辉岩相的矿物组合由于超高压变质作用的叠加一般较难保存, 但可根据具有进变质生长环带的内带成分及其核部包裹的角闪石成分(表1), 利用 Grt-Amp 温度计^[16] 估算其前榴辉岩相的变质温度, 利用角闪石的 Al_{total} 估算其相应的压力^[17], 结果为: $T = 527 \sim 600\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P = 0.91 \sim 0.98\text{ GPa}$ 。

为了对鱼卡地区榴辉岩的峰期变质 P - T 条件有更明确的认识和限定, 选取石榴石中 MgO 、绿辉石中 Al^{3+} 和 Na^{+} 以及多硅白云母中 Si^{4+} 较高且相邻的点组成矿物对(表1), 采用 Powell^[18] 和 Krogh^[19] 的 Grt-Cpx 温度计以及 Green & Hellman^[20] 的 Grt-Ph 温度计, 结合 Waters^[21] 提出的 Grt-Cpx-Ph 压力计进行 P - T 的综合评价, 获得的 P - T 条件为 $T = 675 \sim 711\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $P = 2.62 \sim 3.07\text{ GPa}$ 。

针对强角闪石化榴辉岩(09NQ19)同时存在共生的黑云母和石榴子石(表1), 采用 Grt-Bt ^[22] 温度计, 结合单斜辉石中硬玉分子成分压力计^[23-24] 以及多硅白云母地质压力计^[25], 得出角闪岩相退变质地质条件: $T = 633 \sim 687\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P = 1.33 \sim 1.72\text{ GPa}$ 。由于榴辉岩中的黑云母形成于深俯冲后折返退变质作用的初期, 因此该温压结果可能代表的是榴辉岩角闪岩相退变质作用早期的温压条件。

退变质榴辉岩(09NQ29)可以观察到少量由 $\text{Amp-II} + \text{Pl-II}$ 组成的后成合晶以及大量的自形-半自形角闪石和石榴子石, 构成新的 $\text{Grt} + \text{Amp-III} + \text{Pl-III} + \text{Qz} \pm \text{Bt}$ 矿物平衡组合(图2d)。选取这类岩石中相邻的石榴子石和角闪石, 通过 Grt-Amp ^[16] 地质温度计以及 Grt-Amp-Pl-Qz 压力计^[26] 估算压力, 得出 $T = 490 \sim 587\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P = 0.56 \sim 0.88\text{ GPa}$ 。

4 结 论

鱼卡地体中的榴辉岩的矿物化学和岩相学研究显示其经历了前榴辉岩相变质、榴辉岩相变质和后榴辉岩相变质3期与俯冲和折返作用有关的演化过程, 通过以上对榴辉岩不同演化阶段的 P - T 估算, 绘制出鱼卡榴辉岩的变质演化 P - T 轨迹, 见图4。研究结果显示, 变质演化经历了从最初增温增压的进变质到温度和压力都达到顶峰的峰期变质, 再到降温降压的退变质这样一个“发卡”型顺时针 P - T 演化过程。榴辉岩压力峰期和温度峰期同时达到, 反映了榴辉岩的进变质和退变质阶段均具有较低的地温梯度; 榴辉岩中进变质矿物组合和生长环带得以很好的保存, 说明榴辉岩的形成经历了快速俯冲和折返的动力学过程。

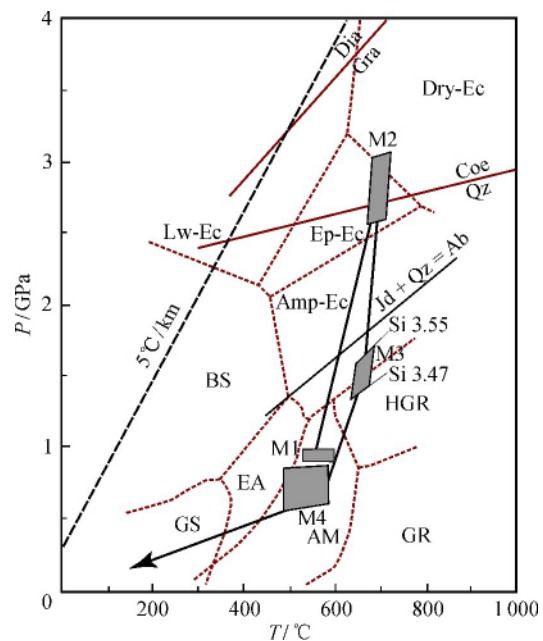


图4 鱼卡地区榴辉岩 P - T 轨迹图
Fig. 4 Estimated P - T path for eclogites from the Yuka terrane in the North Qaidam UHP metamorphic belt

表 1 榴辉岩和退变质榴辉岩代表性矿物成分

		Representative mineral compositions of eclogites and retrograde eclogites												$w_B/\%$	
样品		09NQ08				09NQ23				09NQ19				09NQ29	
矿物	位置	Grt-c	Amp-i	Grt-c	Amp-i	Grt-r	Cpx-r	Ph-r	Grt-r	Grt-r	Bt	Crt	Bt	Grt	Pl
		52	62	139	152	80	82	73	144	81	71	128	136	1	11
SiO ₂		39.21	46.29	38.09	44.55	39.09	56.55	48.69	38.63	55.70	48.31	37.59	37.42	39.67	62.81
TiO ₂		0.12	0.53	0.12	0.31	0.80	0.08	0.61	0.03	0.05	0.32	0.07	2.83	0.06	0.00
Al ₂ O ₃		21.94	15.28	22.10	14.07	21.46	9.44	28.20	22.10	10.68	26.34	21.37	15.06	22.10	19.62
FeO		26.08	11.02	25.15	8.91	23.46	3.92	1.93	24.12	2.83	1.42	29.96	16.90	21.73	1.36
MnO		0.36	0.03	0.32	0.03	0.39	0.04	0.00	0.19	0.08	0.00	0.69	0.06	0.37	0.05
MgO		4.05	11.32	4.45	13.02	4.23	9.43	3.15	6.61	9.30	3.81	4.07	12.73	7.83	1.63
CaO		9.77	8.84	10.47	8.89	11.57	14.88	0.00	7.71	13.97	0.00	6.14	0.01	9.20	3.45
Na ₂ O		0.00	4.05	0.04	4.27	0.00	5.91	0.67	0.02	6.22	0.62	0.02	0.15	0.05	9.44
K ₂ O		0.00	0.61	0.00	0.58	0.00	0.00	9.97	0.00	0.00	10.28	0.00	9.71	0.02	0.09
总和		101.52	97.95	100.72	94.62	101.00	100.25	93.21	99.43	98.82	91.10	99.91	94.90	101.03	98.45
Si		3.02	6.64	2.96	6.60	3.01	2.01	3.32	2.99	2.00	3.37	2.98	2.84	3.00	2.91
Al ^{IV}		0.00	1.30	0.04	1.37	0.00	0.00	0.68	0.01	0.00	0.63	0.02	1.16	0.00	0.52
Al ^{VI}		1.99	1.28	1.98	1.09	1.95	0.40	1.58	2.01	0.45	1.54	1.98	0.18	1.97	1.07
Ti		0.01	0.06	0.01	0.03	0.05	0.00	0.03	0.00	0.00	0.02	0.00	0.16	0.00	0.01
Fe ^{total}		1.68	1.32	1.63	1.10	1.51	0.12	0.11	1.56	0.08	0.08	1.99	1.07	1.38	0.59
Mn		0.02	0.00	0.02	0.00	0.03	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.05	0.00	0.02	0.01
Mg		0.46	2.42	0.52	2.87	0.49	0.50	0.32	0.76	0.50	0.40	0.48	1.44	0.88	3.76
Ca		0.81	1.36	0.87	1.41	0.95	0.57	0.00	0.64	0.54	0.00	0.52	0.00	0.75	1.31
Na		0.00	1.13	0.00	1.23	0.00	0.41	0.09	0.00	0.43	0.08	0.00	0.02	0.00	0.85
K		0.00	0.11	0.00	0.11	0.00	0.00	0.87	0.00	0.00	0.92	0.00	0.94	0.00	0.01
Fe ³⁺		0.00	0.00	0.08	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00		0.05		0.02	0.00
Fe ²⁺		1.68	1.32	1.55	1.10	1.51	0.12		1.56	0.08		1.93	1.72	1.35	0.59
Sum		8.00	15.62	8.00	15.81	8.00	4.00	7.00	8.00	4.00	7.00	8.00	7.81	8.00	5.00

摇注: Grt—石榴石; Grt-c—石榴石核部; Amp—角闪石; Amp-i—石榴石中角闪石包体; Cpx-r—绿辉石边部; Ph-r—多硅白云母边部; Bt—黑云母; Pl—斜长石。

参考文献:

- [1] Song S G, Yang J S, Liou J G, et al. Petrology, geochemistry and isotopic ages of eclogites from the Dulan UHPM Terrane, the North Qaidam, NW China [J]. *Lithos*, 2003, 70 (3-4): 195-211.
- [2] Song S G, Zhang L F, Niu Y L, et al. Geochronology of diamond-bearing zircons from garnet peridotite in the North Qaidam UHPM belt, Northern Tibetan Plateau: A record of complex histories from oceanic lithosphere subduction to continental collision [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 234 (1-2): 99-118.
- [3] 杨经绥, 许志琴, 李海兵, 等. 我国西部柴北缘地区发现榴辉岩 [J]. *科学通报*, 1998, 43 (14): 1544-1549.
- [4] Song S G, Yang J S, Xu Z Q, et al. Metamorphic evolution of the coesite-bearing ultrahigh-pressure terrane in the North Qaidam, Northern Tibet, NW China [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2003, 21 (6): 631-644.
- [5] Yang J S, Xu Z Q, Song S G, et al. Discovery of coesite in the North Qaidam Early Palaeozoic ultrahigh pressure (UHP) metamorphic belt NW China [J]. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series IIA - Earth and Planetary Science* 2001, 333(11): 719-724.
- [6] Zhang G B, Ellis D J, Christy A G, et al. UHP metamorphic evolution of coesite-bearing eclogite from the Yuka terrane, North Qaidam UHPM belt, NW China [J]. *European Journal of Mineralogy*, 2009, 21 (6): 1287-1300.
- [7] Zhang J X, Meng F C, Li J P, et al. Coesite in eclogite from the North Qaidam Mountains and its implications [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54 (6): 1105-1110.
- [8] Liu X C, Wu Y B, Gao S, et al. First record and timing of UHP metamorphism from zircon in the Xitieshan terrane: Implications for the evolution of the entire North Qaidam metamorphic belt [J]. *American Mineralogist*, 2012, 97 (7): 1083-1093.
- [9] Chen D L, Liu L, Sun Y, et al. Geochemistry and zircon U-Pb dating and its implications of the Yuka HP/UHP terrane, the North Qaidam, NW China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2009, 35 (3-4): 259-272.
- [10] Menold C A, Manning C E, Yin A, et al. Metamorphic evolution, mineral chemistry and thermobarometry of orthogneiss hosting ultrahigh-pressure eclogites in the North Qaidam metamorphic belt, Western China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2009, 35 (3-4): 273-284.
- [11] Zhang J X, Yang J S, Mattinson C G, et al. Two contrasting eclogite cooling histories, North Qaidam HP/UHP terrane, western China: Petrological and isotopic constraints [J]. *Lithos*, 2005, 84 (1-2): 51-76.
- [12] 张建新, 于胜尧, 孟繁聪. 柴达木北缘鱼卡-落凤坡榴辉岩-片麻岩单元的变质变形演化 [J]. *地质通报*, 2008, 27 (9): 1468-1474.
- [13] Droop G T R. A general equation for estimating Fe^{3+} concentrations in ferromagnesian silicates and oxides from microprobe analyses, using stoichiometric criteria [J]. *Mineralogical Magazine*, 1987, 51 (3): 431-435.
- [14] Holland T, Blundy J. Non-ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole-plagioclase thermometry [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1994, 116 (4): 433-447.
- [15] Leake B E, Woolley A R, Arps C E S, et al. Nomenclature of amphiboles: Report of the Subcommittee on Amphiboles of the International Mineralogical Association, Commission on New Minerals and Mineral Names [J]. *The Canadian Mineralogist*, 1997, 35: 219-246.
- [16] Graham C M, Powell R. A garnet-hornblende geothermometer: calibration, testing, and application to the Pelona Schist, Southern California [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 1984, 2 (1): 13-31.
- [17] Hollister L S, Grissom G C, Peters E K, et al. Confirmation of the empirical correlation of Al in hornblende with pressure of solidification of calc-alkaline plutons [J]. *American Mineralogist*, 1987, 72 (3-4): 231-239.
- [18] Powell R. Regression diagnostics and robust regression in geothermometer/geobarometer calibration: The garnet-clinopyroxene geothermometer revisited [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 1985, 3 (3): 231-243.
- [19] Krogh E J. The garnet-clinopyroxene Fe-Mg geothermometer: A reinterpretation of existing experimental data [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1988, 99 (1): 44-48.
- [20] Green T H, Hellman P L. Fe-Mg partitioning between coexisting garnet and phengite at high pressure, and comments on a garnet-phengite geothermometer [J]. *Lithos*, 1982, 15 (4): 253-266.
- [21] Waters D J. The Garnet-Cpx-Phengite Barometer [EB/OL]. [2015-05-27]. <http://www.earth.ox.ac.uk/~davewa/research/eclogites/ecbarcal.html>.
- [22] Indares A, Martignole J. Biotite-garnet geothermometry in the granulite facies: The influence of Ti and Al in biotite [J]. *American Mineralogist*, 1985, 70 (3-4): 272-278.
- [23] Holland T J B. The reaction albite = jadeite + quartz determined experimentally in the range 600-1200 °C [J]. *American Mineralogist*, 1980, 65 (1-2): 129-134.
- [24] Holland T J B. The experimental determination of activities in disordered and short-range ordered jadeitic pyroxenes [J].

- Contributions to Mineralogy and Petrology, 1983, 82 (2): 214–220.
- [25] Massonne H-J, Szpurka Z. Thermodynamic properties of white micas on the basis of high-pressure experiments in the systems $K_2O - MgO - Al_2O_3 - SiO_2 - H_2O$ and $K_2O - FeO - Al_2O_3 - SiO_2 - H_2O$ [J]. Lithos, 1997, 41 (1–3): 229–250.
- [26] Kohn M J, Spear F S. Two new geobarometers for garnet amphibolites, with applications to southeastern Vermont [J]. American Mineralogist, 1990, 75 (1–2): 89–96.

Metamorphic *P-T* evolution of the Yuka eclogite in Northern Qaidam

HU Rong-guo^{1,2}, ZHAO Yi-lai¹, XIA Zhi-peng², QIU Hua-ning²

(1. a. Guangxi Key Laboratory of Hidden Metallic Ore Deposits Exploration; b. College of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China; 2. State Key Laboratory of Isotope Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The Yuka eclogite-gneiss terrane is located in the northwestern segment of the North Qaidam UHP metamorphic belt. Eclogites and ultramafic rocks occur as lenses, the shape of puolding and like layer in the gneiss or schist. The typical mineral assemblage of the eclogite is composed of garnet (Grt), omphacite (Omp), phengite (Ph) and rutile (Rt). Garnet porphyroblasts from the eclogite are commonly characterized by zoning in both composition and mineral inclusions. Petrography and mineral chemistry indicate that the eclogites record a four stage evolution connected to Early Paleozoic burial and subsequent exhumation: A pre-peak stage of metamorphism (M1) is indicated by inclusions such as minor amphibole, epidote and quartz in garnet cores in coarse-grained eclogite and by the prograde zonation of garnet. *P-T* conditions of the pre-peak stage are estimated at 0.91–0.98 GPa and 527–600 °C. The peak UHP stage (M2) is dominated by the development of the equilibrium assemblage garnet-omphacite-phengite-rutile-quartz. The *P-T* conditions of the peak-stage of the coarser-grained and fine-grained eclogites are estimated at 2.62–3.07 GPa, 675–711 °C, respectively. In retrogressed eclogites, the granulite–upper amphibolite facies retrograde stage (M3) is reflected by the formation of symplectites with plagioclase and lower sodium-content clinopyroxene and subsequent Amp + Pl symplectites after omphacite. Phengite was replaced by Bt + Pl symplectite in the rim. *P-T* conditions of this stage are estimated at 1.33–1.72 GPa and 633–687 °C. The retrograde amphibolite-facies stage (M4) is preserved by the garnet amphibolite and is characterized by clinopyroxene replacement by vermicular Amp + Pl symplectites and coarse-grained amphibole, while garnet breaks down to biotite and chlorite. The *P-T* conditions of this stage are estimated at 0.56–0.88 GPa and 490–587 °C. The combined *P-T* data construct a tight clockwise metamorphic evolution path from the peak eclogite to retrogressed amphibolite facies, and are characterized by a near isothermal decompression.

Key words: eclogite; ultrahigh pressure metamorphism; *P-T* path; North Qaidam